A propósito de las bóvedas de crucería y otras bóvedas medievales

Arturo ZARAGOZÁ CATALÁN

Podemos considerar una bóveda de crucería como aquella en la cual la forma de la bóveda se logra mediante el cruce de arcos diagonales llamados también nervios. Estos arcos sirven de directriz para el trazado de unas superficies de doble curvatura que llamamos plementerías.

En lo constructivo, las bóvedas de crucería admitieron materiales muy variados, distintos procedimientos constructivos y se completaron con trasdosados muy diversos. Las variantes regionales y locales fueron numerosas, de hecho los intentos de simplificar la riqueza de la construcción medieval han sido siempre una fuente de errores.

La bóveda de crucería ha sido descrita como el gran hallazgo de la arquitectura medieval para facilitar el proceso constructivo de los abovedamientos: en lugar de trazar geométricamente los plementos para buscar posteriormente la curva compleja de la intersección de éstos, se comenzaba situando los arcos de intersección trazados geométricamente. La plementería se tendía a partir de éstos. La construcción de una bóveda de crucería simple requería únicamente la montea de un elemento de dos dimensiones significativas como es el arco. La única pieza de mayor complejidad era la clave de la bóveda, lugar en el que se reunían diversos arcos tendidos desde distintos puntos.

La estética romántica del siglo XIX y la expresión entusiasta, aunque en ocasiones contradictoria, de Viollet-le-Duc insistieron en la ruptura que el pensamiento técnico del primer gótico había realizado respecto a periodos anteriores. Pero una larga corriente interpretativa nacida ya en el siglo XIX y cuyo mejor representante en España fue Leopoldo Torres Balbás demostró que algunas bóvedas de crucería medievales fueron herederas de anteriores experiencias romanas.

Equívoco generalizado y añadido en el debate de los abovedamientos fue asimilar todas las bóvedas de crucería a un mismo (o a muy pocos) modelos estructurales. En realidad la variedad fue enorme. Como se verá, los construidos durante la Edad Media en los paises ribereños del Mediterráneo participaron inicialmente, en mayor medida, de las tradiciones tardorromanas. Al llegar al siglo XV una insistente investigación exploró soluciones diversas a las del norte europeo. La fortuna de todas estas experiencias hizo que las consecuencias llegaran hasta nuestros días.

1. Paneles flexibles sobre un esqueleto de nervaduras

Los primeros estudios sistemáticos y modernos sobre bovedas medievales fueron realizados a mediados del siglo XIX por el presbítero, historiador e ingeniero Robert Willis (1800-1875) en Inglaterra y por el arquitecto Eugène E. Viollet-le-Duc (1814-1879) en Francia. A finales del siglo XIX el ingeniero e historiador August Choisy (1841-1909) publicó otra obra ingente y monumental: *Histoire de l'Architecture* (1899). A los bellísimos dibujos e interesantes comentarios de Viollet-le-Duc se añadió una sólida y amplia historia de la construcción. La obra de Choisy iba acompañada de unos originales dibujos realizados en axonometría oblicua, o perspectiva caballera, que prestaban una imagen analítica y rigurosa a la narración.

La obra de Choisy abarca desde la prehistoria hasta el siglo XVIII. En ocasiones toma prestadas ideas coetáneas sobre el funcionalismo o sobre la arquitectura de los nuevos materiales. Tratando el periodo medieval escribe que los constructores góticos asignan a los nervios un papel esencial permanente. Es sobre ellos donde descansa la bóveda. En lugar de integrar las nervaduras en el macizo de la bóveda, las desgajan. Incluso el macizo lo reemplazan por paneles ligeros, sin rigidez, casi sin ligazón los unos con los otros. Según Choisy la bóveda antigua era una concreción inerte. La bóveda gótica sería una conjunción de paneles flexibles sobre un esqueleto de nervaduras.

Estas ideas no sólo fueron aceptadas sino muchas veces exageradas. El historiador J.A. Brutails llegó a decir que el sistema era análogo al de una cubierta de zinc sostenida por una armadura de hierro. La idea fue recogida por la Historia del Arte, entendida como historia de los estilos, para explicar el inicio de la arquitectura gótica. Posteriormente las críticas a este modelo serían, sencillamente, ignoradas. Todavía hoy alguna variante del dibujo de la bóveda de crucería de Choisy sigue apareciendo en manuales y publicaciones de divulgación.

Les constructeurs gothiques assignent aux nervures un rôle essentiellement permanent, c'est sur elles que la voûte repose; au lieu de noyer ces nervures dans le massif, ils les dégagent; et le massif lui-même, ils le remplacent par des panneaux légers, sans rigidité, presque sans liaison les uns avec les autres : la voûte antique était une concrétion inerte, la voûte gothique est un assemblage de panneaux flexibles sur un squelette de nervures.

3

Fig. 1. La bóveda de crucería según A. Choisy, *Histoire de l'Architecture*.

El enorme peso de la obra de Viollet-le-Duc y Choisy, así como el prestigio de sus autores, ahogó las escasas discrepancias ante el modelo estructural propuesto. El giro en el entendimiento



Fig. 2. Bóveda de crucería en pie, sin los nervios cruceros, perdidos en un bombardeo de la Segunda Guerra Mundial, en la iglesia de santo Domingo en Cagliari, Cerdeña.

de la mecánica estructural de las bóvedas se produjo como consecuencia de los bombardeos de las catedrales góticas del norte de Francia durante la primera guerra mundial de 1914-1918. Las catedrales de Reims, Noyon y Soissons, entre otras, sufrieron la rotura de los arbotantes y la caída de algunos nervios, que se suponían indispensables para su estabilidad, sin que las bóvedas sufrieran una definitiva ruina.

Entre las primeras críticas realizadas a la teoría mecánica de Viollet-le-Duc y Choisy pueden destacarse dos nombres: el ingeniero Victor Sabouret y el arquitecto Pol Abraham. Sabouret analizó las patologías características de las bóvedas de cucería dando su nombre a las famosas «grietas de Sabouret». Su crítica a la teoría tradicional puede resumirse con el título de un artículo publicado en 1928: «Las bóvedas de arista sobre nervaduras, papel simplemente decorativo de las nervaduras». Por su parte Pol Abraham publicó en 1934 un artículo en el *Bulletin Monumental* con el título *Viollet-le-Duc et le rationalisme médiéval*. En este artículo señaló que «respecto a la estructura, es decir, al equilibrio general del edificio, el empleo de los nervios es practicamente indiferente». Unicamente reconoció que en casos excepcionales de nervios u ojivas extraordinariamente gruesos, como los empleados en el siglo XII en pórticos, torres, campanarios, sótanos o construcciones militares, refuerzan la bóveda, aumentando su resistencia.

La versión española de esta historia se remonta a 1920, año en el que un joven Torres Balbás (1888-1960) afirmaba que, según su experiencia, en bastantes casos los nervios no soportaban la bóveda y podían desaparecer sin riesgo de ésta.

Pero sería con motivo de la guerra civil española de 1936-1939 cuando habría nueva ocasión para poner a prueba las teorías. El incendio de algunas iglesias góticas en Barcelona (santa Ana, la capilla de la comunión de santa María del Pino...) permitió a Bassegoda comprobar que aunque habian desaparecido los nervios (y en algún caso la plementería) el grueso de las bóvedas permanecía en su lugar. Torres Balbás, por su parte, pudo hacer interesantísimas observaciones al acometer obras

de urgente reparación en la catedral de Sigüenza. En el mismo año 1938 publicaba lo siguiente:

> Al dirigir las obras de reparación de la catedral de Sigüenza, en la estabilidad de cuyas bóvedas, con grandes perforaciones en puntos vitales, caídos buena parte de sus arcos ojivos, roto alguno de los fajones y desaparecidos los muros en los que apoyaban los formeros, así como éstos, tuvimos justificada fe, olvidando que, según las teorías «clásicas», pronta y forzosamente habían de dar en tierra. Vengo a deciros lo que ví y lo que hice, evocando unas horas inolvidables en las que, tras el dolor de contemplar la ruina de uno de nuestros más viejos y sugestivos templos góticos, veía el interés de poder, merced a sus mutilaciones, estudiar admirablemente su estructura interna, aprovechando esas enseñanzas para su reconstrucción y para el conocimiento de la arquitectura medieval.
>
> Desde hace tiempo se vienen observando bóvedas de ojivas que después del desprendimiento de éstas se conservan en excelentes condiciones de equilibrio. La catedral de Sigüenza nos ofrece un buen testimonio de este hecho. Las bóvedas de crucería que cubren los tramos de su nave central –10 por 11,50 metros–, lo mismo que las sexpartitas del brazo Norte del crucero y del presbiterio, de alguna más luz la última, unas y otras del siglo XIII, perdieron varias de las ramas de los arcos ojivos y, a pesar de estar perforados los plementos de las de la nave y caída buena parte de la del presbiterio, aquellas y la porción conservada de la última mantienen un equilibrio desde hace cerca de dos años. Las de la nave se están acabando de reparar actualmente sin completar los arcos ojivos, lo que habrá que hacer el día de mañana para su mejor aspecto, pero no para su estabilidad, que es hoy completa. En iglesias góticas francesas tan importantes como Saint-Remi y la catedral de Reims y las catedrales de Noyon y de Soissons se han señalado hechos idénticos, por lo que se pueden enunciar la conclusión de que *en el estado actual de muchas bóvedas de ojivas, la verdadera bóveda la constituye la plementería; los arcos ojivos son independientes de ella, pudiendo desaparecer sin que se altere la estabilidad de la bóveda.*
>
> Uno de los arcos fajones de la nave mayor de la catedral de Sigüenza, alcanzado por los proyectiles de artillería, quedó casi totalmente degollado por unos de sus riñones; una profunda grieta le separa de la porción que hay sobre él de bóveda de medio cañón agudo entre las ojivas inmediatas. Sin hacer caso de ese arco fajón, que no ha tenido el más pequeño movimiento, hemos consolidado la bóveda situada sobre él, rellenando con sillarejos sus perforaciones y cargando encima el peso de la parte correspondiente de la cubierta de ladrillo. Se deduce, pues, que *en la nave central de la catedral de Sigüenza los arcos fajones son independientes de las bóvedas, a cuya estabilidad no contribuyen, no habiendo solución de continuidad entre las bóvedas de los cuatro tramos de dicha nave; los arcos fajones no soportan más que su propio peso, pudiendo desaparecer sin peligro para la estabilidad de esas bóvedas.* Aunque este mismo hecho se ha observado en iglesias medio arruinadas por la guerra europea, no nos atrevemos a generalizarlo mientras otras observaciones no vengan a confirmarlo.
>
> El bombardeo destruyó en la catedral de Sigüenza los arcos formero del muro Norte de la nave central correspondientes a tres tramos y buena parte del muro situado bajo ellos, en el que se abrían las ventanas; de alguno de los plementos o cañones-formeros, como los llama Abraham, también se desprendieron las dovelas inmediatas a los arcos formeros, sin que el equilibrio del resto de las bóvedas –perforados y caídos parte de sus arcos ojivos, como se ha dicho– sufriese alteración. Sin preocuparnos de apear esas partes de los cañones-formeros, ni siquiera las hiladas de dovelas agrietadas y medio desprendidas, levantamos los trozos de muro destruídos y sobre ellos los arcos fajones, completando las dovelas



Fig. 3. Ladrillos aplantillados pertenecientes a los nervios de sendas bóvedas de crucería (con plementos tabicados), procedentes de las iglesias de Torreblanca y de la cartuja de Valdecristo, ambas de Castellón.

hasta cerrar las bóvedas por esa parte. *En la catedral de Sigüenza,* pues, *las bóvedas de ojivas de la nave mayor son completamente independientes de los arcos formeros y de los muros en los que éstos están empotrados, pudiendo desaparecer unos y otros sin que el equilibrio de las bóvedas se altere; las bóvedas abombadas tampoco ejercen acción alguna sobre los muros exteriores.* Creemos también que esta observación puede extenderse a la mayoría de las bóvedas de crucería.

Finalmente, anotemos el hecho, al que nos hemos referido anteriormente, de mantenerse en perfecto equilibrio bóvedas de ojivas con grandes perforaciones en la región, que se supone crítica, de las aristas. En la bóveda sexpartita del brazo norte del crucero existía un enorme boquete que afectaba a los arranques correspondientes al ángulo del Noroeste hasta los riñones; había desaparecido también el arco formero que la separaba del tramo central del crucero y, totalmente, uno de los arranques de la bóveda inmediatos a él, con los trozos de plementería más próximos. De la bóveda sexpartita del presbiterio tan sólo se conserva, aproximadamente, la mitad, faltando la clave y tres de los ocho nervios que partían de ella; de los conservados se han desprendido por completo los nervios o molduras. Las partes subsistentes de ambas se conservaban en buenas condiciones de equilibrio; la del brazo Norte del crucero fue destruida por un bombardeo en el mes de enero último; la otra se mantiene después de su ruina parcial y nos limitaremos a completar sus plementos cuando llegue al momento de su reparación.

Las perforaciones de las bóvedas de la nave mayor se han reparado sin recurrir a andamio alguno y no empleando tampoco cerchas: un operario colgado en una jaula, ayudado por otros situados en el trasdós de la bóveda, iban colocando y acuñando sillarejos paralelipédicos hasta conseguir cerrar los huecos. La conclusión será la de que *algunas bóvedas de ojivas de la catedral de Sigüenza, desprovistas en parte de sus arcos ojivos y de uno de sus formeros, y con grandes perforaciones en los aristones y en las enjutas, se sostenían en buenas condiciones de equilibrio, lo mismo que las partes subsistentes de otras sexpartitas, aún más alteradas, de algunas de las cuales falta la mitad, además de todos los nervios de la parte conservada.* Bóvedas en parecido estado de destrucción y, sin embargo, en pie, se vieron en las catedrales de Reims, Soissons y Noyon.



Fig. 4. Bóvedas de crucería con plementos tabicados fotografiados durante su demolición en 1937 de la iglesia de santa María de Castellón de la Plana.

He considerado oportuno repetir estos largos párrafos de Torres Balbás, fechados en Soria, en plena guerra civil, en julio-agosto de 1938 por su interés y por la dificultad de consultar la revista en la que se publicaron, *Las Ciencias* nº 1, 1939 (tampoco se recogieron en la publicación de su «obra dispersa»). El mismo autor finaliza su artículo preguntándose que función tienen los nervios:

> Ayudar a la construcción sirviendo de cimbras provisionales; facilitar el trazado de la bóveda, dándole forma, moldeándola; producir un determinado efecto plástico: tal es la utilidad de los arcos ojivos, lo mismo que de los fajones y formeros. En todas las hipótesis que sobre ella se han hecho, había una parte de verdad. No son cimbras permanentes, pero lo fueron provisionalmente; no sostienen hoy la bóveda, pero contribuyeron a soportarla durante algún tiempo; no se labraron como tapajuntas, pero es el caso que ocultan los chaflanes de intersección de los plementos y el encuentro de éstos con los muros y con los de la bóveda contigua; no tienen exclusivamente un fin plástico e ilusionista, pero no cabe duda es el esencial de los que han desepeñado y el único que hoy desempeñan.

La experiencia narrada por Torres Balbás puede repetirse facilmente hoy día con sólo subir a los andamios de las numerosas obras de restauración de bóvedas que frecuentemente se realizan.

Durante los años 1970 y 1980 Robert Mark realizó análisis elásticos mediante modelados fotoelásticos a partir de la aplicación de técnicas ya utilizadas en el comportamiento estructural de prototipos para la industria aeronautica y nuclear. Tam-

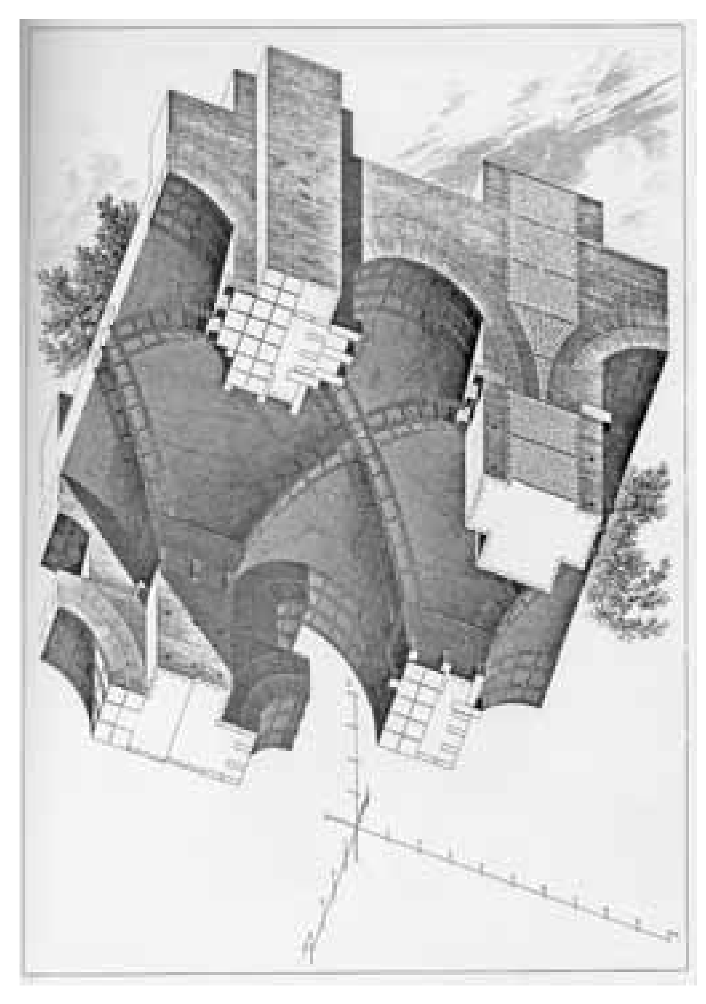


Fig. 5. Bóveda de arista romana con nervios de ladrillo en el Palatino, según A. Choisy *L'Art de bâtir chez les romains.*

bién se empezaron a aplicar los programas de elementos finitos al estudio de arcos y bóvedas de fábrica. Pero como ha señalado el profesor Santiago Huerta (2004), sin clarificar las condiciones de contorno y con la enorme dificultad de caracterizar un material esencialmente heterogéneo como es la fábrica, el resultado de un largo cálculo de ordenador puede no ser relevante en absoluto para entender el funcionamiento de la estructura.

La definitiva comprensión del comportamiento de las bóvedas de crucería debe realizarse dentro del marco de la tradición del cálculo por equilibrio y de los principios del análisis límite expuestos por Jacques Heiman (1995). Este último ha señalado que

> ...el nervio cumple una función estructural muy necesaria como refuerzo de las aristas, aunque puede no ser esencial. Además, como se ha visto, facilita la construcción de los plementos, permite eliminar parte de las obras auxiliares y cubre las juntas defectuosas de las aristas. Finalmente, el nervio puede desempeñar un papel estético.

2. Materiales: piedra, ladrillo a rosca y tabicados

El imaginario común de la arquitectura gótica nos remite a las fábricas de cantería con sillares, nervios y plementerías de piedra labrada, sin embargo, la realidad fue muy diferente. La elección de los materiales se debía, igual que ahora, al empleo de soluciones que permitieran aprovechar al máximo los recursos de que proveía la naturaleza, a la persistencia de tradiciones constructivas locales, a los ajustes de la economía y también, aunque en menor medida, al capricho, o a la moda.

Una de las muchísimas versiones locales diferentes de la construcción en piedra es aquella que construye las plementerías de las bóvedas con ladrillo dispuesto a rosca y los nervios de piedra. La arquitectura medieval del Languedoc, del norte de Italia y de todo el norte europeo responde a arquitecturas de ladrillo. En España el empleo del ladrillo fue también abundante y ha sido estudiado monográficamente por Philippe Araguas (2003). Separado de estos grandes núcleos, uno de los variados ejemplos de especificidad local y uso temporal ocurre en Valencia

Este sistema constructivo se utilizó en Valencia en construcciones de prestigio destinadas a iglesias, a capillas o a salas capitulares de conventos. La catedral de Valencia está toda ella construida con este sistema, tanto la obra inicial del siglo XIII de las naves, crucero y girola, como las construcciones posteriores: la sala capitular, el cimborrio y la ampliación cuatrocentista de la *arcada nova* o crujía de los pies. En la ciudad de Valencia se utilizó este sistema también en la sala capitular del convento de Santo Domingo. Fuera de la ciudad de Valencia pueden relacionarse diversas construcciones que abarcan una discreta área de dispersión que va desde la Plana de Castellón, por el norte, a la Ribera del Júcar por el sur. Su utilización fue universal en esta zona en los siglos XIII y XIV. En cambio, en el siglo XV solo se utilizó para completar fábricas del mismo tipo.

Estos abovedamientos se levantan sobre planta poligonal en los ábsides y sobre planta cuadrada en los tramos de las naves. Salvo un ejemplo relativamente tardío (la sala capitular de la catedral de Valencia, construida a mediados del siglo XIV) adoptan siempre la crucería simple con potentes nervios de piedra de sencilla molduración. Los arcos cruceros son de medio punto. Utilizan claves muy pequeñas o no significadas como tales, señalando únicamente el cruce de los arcos. Las plementerías son de ladrillo tomado a rosca, siguiendo muchas veces hiladas de desigual alineación separadas por amplios tendeles de argamasa de cal, con los senos de las bóvedas rellenos de hormigón aligerado con vasijas de cerámica.



Fig. 6. Trasdós de una bóveda de crucería del siglo XIV, aligerada con vasijas cerámicas en Villafamés (Castellón).

El descuido en la disposición de las hiladas y en el grosor de las juntas sugiere que el proceso constructivo de las plementerías podría asimilarse en mayor medida a la construcción de una fábrica de tapia que a una de ladrillo. La utilización de unos table-



Fig. 7. Clave del ábside de la catedral de Tortosa (siglo XIV) de 2,60 metros de diámetro y más de seis toneladas de peso.

ros apoyados en los nervios, o situados entre éstos, que sirvieran para apoyar los ladrillos y verter la argamasa, permitiría avanzar rápidamente en el cerramiento de las bóvedas. El posterior revestimiento del intradós haría que no importara el irregular acabado. Sugiere también este proceso constructivo el que se siguiera utilizando en el siglo XVI, al menos en las comarcas del norte valenciano, aunque en este caso para plementerías de mampostería formada por argamasa y *pedra mortina* (una piedra muy ligera). De hecho en la potente torre campanario de la iglesia arciprestal de Vinaròs (siglo XVI) y en la de la vecina localidad de Traiguera (siglo XVI), ambas en Castellón, han quedado trozos de tablas, tendidas entre los arcos cruceros y formeros que se utilizaron para construir las plementerías de las bóvedas de crucería.

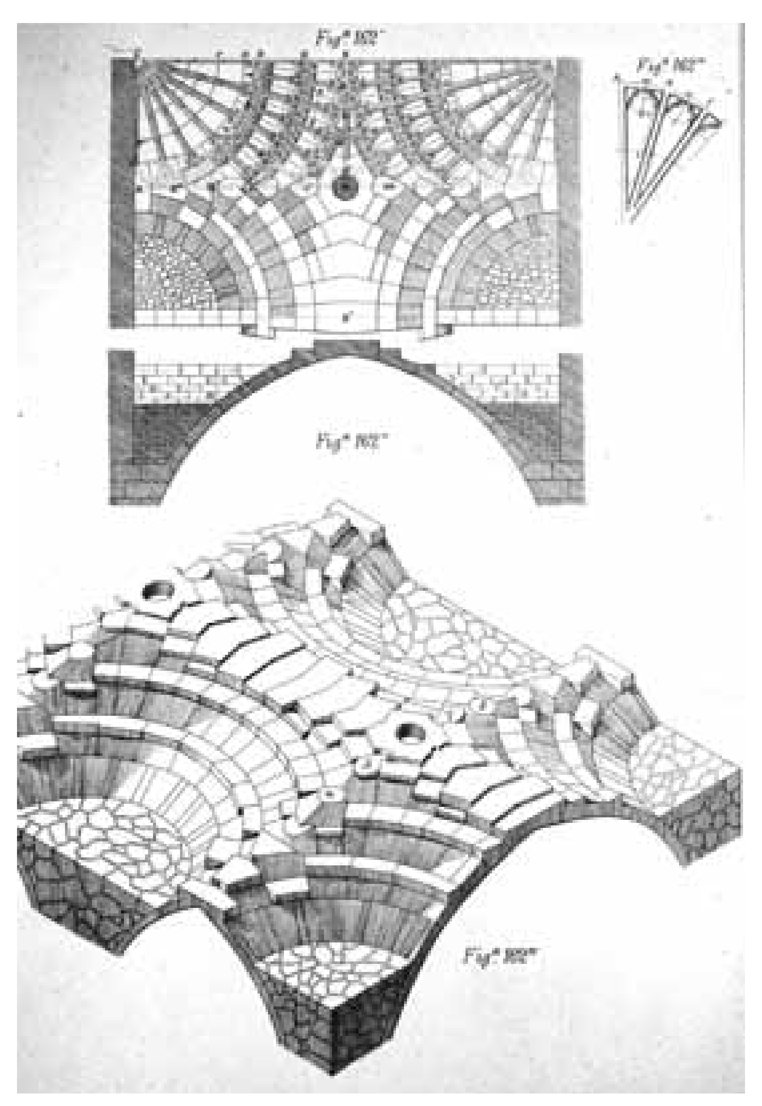
Aunque las noticias documentales son escasas, la cronología de este sistema constructivo en Valencia remite constantemente a las fechas iniciales de la colonización cristiana (a partir de 1238). La mayor facilidad en la puesta en obra de las plementerías de ladrillo y argamasa, frente a las de piedra, permitiría un mejor ajuste geométrico. Las amplias juntas de argamasa ayudarían a aumentar la capacidad de absorber movimientos. Probablemente estas ventajas ayudaron a construir geometrías complejas y alardes constructivos (vg. el cimborrio de la catedral de Valencia o la sala capitular del convento de Santo Domingo de esta ciudad).

En cualquier caso la elección del material en Valencia parece depender de la naturaleza arcillosa del subsuelo y de la fácil mano de obra morisca que fabricaba la cerámica. Frente a esta elección en territorios muy cercanos, y por similares razones de economía de la construcción, se eligieron otros materiales.

Las plementerías de piedra y las claves de gran dimensión

Como se ha dicho, las bóvedas de la arquitectura gótica de la historiografía convencional son aquellas que se construyen con plementerías de piedra de hiladas

regulares sobre nervios de piedra moldurados. En la Corona de Aragón hay tempranos ejemplos construidos con este material en Mallorca y en Cataluña. Las capillas de los palacios de Perpiñán, de Palma de Mallorca y la catedral de esta ciudad, así como las iglesias de Castelló de Ampurias, Santa María de Pedralbes y la catedral de Barcelona podrían iniciar la serie. Este grupo se caracteriza por el rampante llano de las bóvedas, los arcos cruceros dispuestos en ojiva, la regularidad de las hiladas de la plementería y la existencia de enormes claves. Si las primeras características han podido ser heredadas de la arquitectura francesa, la última es muy original y debió obligar a desarrollar peculiares métodos de la organización de la obra. El profesor Bassegoda ha propuesto que primero se situaba la clave en su lugar en el espacio por medio de un castillete y luego se construía el resto de la bóveda:



Para voltear una bóveda gótica es preciso situar la primera piedra que es, precisamente, la clave. Para realizarlo se levanta un castillete de tablones de madera con montantes, travesaños y riostras y forma cuadrada en planta. En el centro y sobre el suelo se colocaba la clave de la bóveda que venía esculpida desde la cantera. Se embragaba con cuerdas de cáñamo o maromas y en lo alto del castillete, sobre una plataforma o tablero, se colocaba la calandria o doble rueda unida por travesaños. Las ruedas se unían con radios al eje donde estaba el rodillo del torno que giraba por el esfuerzo de los operarios que usaban, con manos y pies, los travesaños como escalones de una escalera sin fin, con gran lentitud y en

Fig. 8. Trasdós de la bóveda de abanico de la capilla del King’s College de Cambridge, (Inglaterra), según R. Willis, dibujo de Rovira Rabassa.

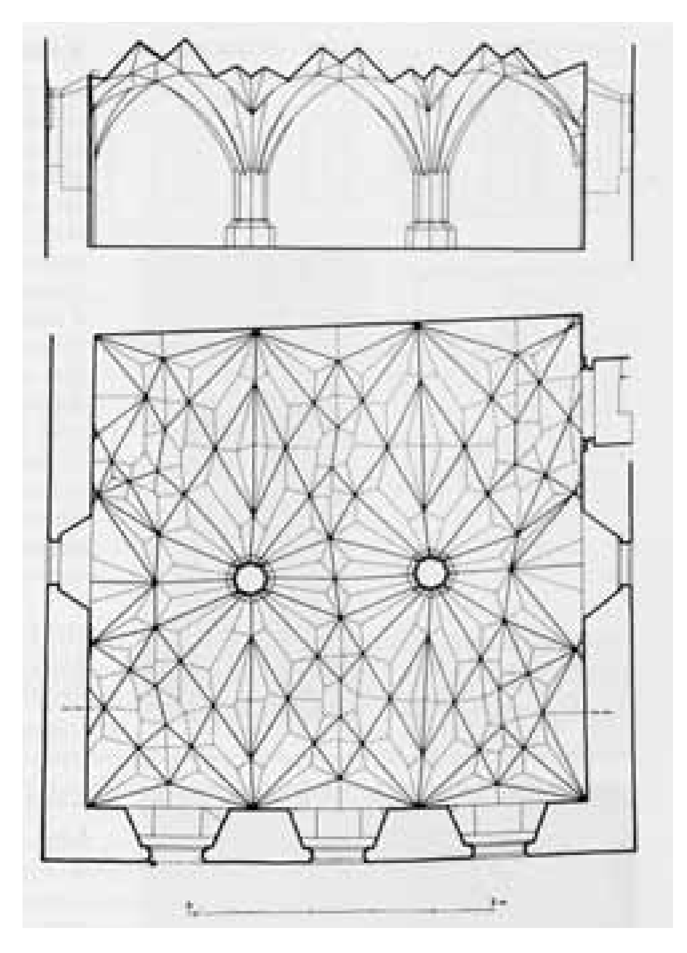


Fig. 9. Bóveda plegada del monasterio de Kadan (Chequia), según Milada y Oldrich Radovi.

medio de chirridos que recordaban las voces de la calandria o la alondra. Una vez alcanzada la posición deseada, se sujetaba la clave mediante traviesas. Entonces se colocaban las cimbras para los nervios cuyas dovelas se aparejaban encima tomándolas con mortero de cal. Luego se montaban las cerchas para sujetar los témpanos.

La doctora Victoria Almuni ha demostrado documentalmente este proceso en la construcción de la bóveda de la catedral de Tortosa. Ha señalado cómo dos meses después de la colocación de la enorme clave (2,70 metros de diámetro) todavía se trabajaba en la construcción del nervio del espinazo con el arco triunfal. Junto con la profesora Mercedes Gómez-Ferrer Lozano (2007) hemos podido documentar también que este sistema se utiliza en el tramo de los pies de la catedral de Valencia.

La volta de barandat *o bóveda tabicada*

Las bóvedas tabicadas son aquellas en las que los ladrillos se disponen de plano y siempre constan, por lo menos, de dos hojas conjuntas alternadas y un grueso intermedio de mortero. Las bóvedas tabicadas se distinguen esencialmente de las otras en que en su construcción, puede prescindirse completamente de la necesidad de cimbras y otros medios auxiliares. Aunque Choisy quiso ver sus precedentes en las cimbras auxiliares de las bóvedas de argamasa romanas, lo cierto es que esta hipótesis no se ha demostrado. Lo único que sabemos con documentación segura, gracias a las noticias aportadas por los profesores Mercedes Gómez-Ferrer Lozano (2003) y Philippe Araguas (2003), es que las primeras bóvedas tabicadas conocidas se construyeron en Valencia antes de 1383 como plementerías de bóvedas de crucería. Las bóvedas de crucería con nervios de piedra y plementerías de ladrillo a rosca

debieron preparar el camino. Las plementerías de las bóvedas de crucería del claustro del convento de Santo Domingo siguen este sistema constructivo. Lo mismo ocurre con las plementerías del convento del Carmen, también de Valencia, una de cuyas pandas se construyó hacía 1400 repitiendo el sistema de otras ya construidas. Este sistema constructivo se extendió rápidamente por los otros territorios de la Corona de Aragón: Cataluña, Aragón y Sicilia. En el siglo XVI se extendería por Castilla e Italia y viajaría a América. Los numerosos ejemplos de Cuba, Puerto Rico y México así lo demuestran.

Las bóvedas tabicadas nacieron, seguramente, como solución rápida y económica para cerrar las plementerías de las bóvedas de crucería con nervios de piedra a comienzos del siglo XIV. Pero hay un grupo de abovedamientos que pueden adscribirse al giro que adopta la arquitectura valenciana a mediados del siglo XV. Todas ellas se realizaron en importantes monasterios de la ciudad o de su entorno próximo que renovaron parte de sus fábricas en esta época. Todas, a su vez, combinan la excelente cantería del cuatrocientos valenciano con bóvedas aristadas tabicadas de ladrillo. El resultado parece traducir las formas pétreas aristadas, inventadas por Francesc Baldomar, al ladrillo. Esta fórmula tuvo una enorme fortuna que se prolongaría hasta mediados del siglo XVI. La mayoría de ellas, por sus correspondencias formales, pueden vincularse en sus comienzos, a una misma personalidad (Francesc Martí, o Martínez, *Biulaygua*) o, al menos, a un mismo círculo. Las obras a las que nos referimos son algunas dependencias anejas del real monasterio de la Trinidad en Valencia, del monasterio de santa María de Valldigna, al claustro de las recordaciones de la cartuja de Portaceli y a ciertas dependencias de la cartuja de Valdecristo. Las bóvedas aristadas tabicadas pueden verse nuevamente en el archivo de la catedral de Valencia, obra de finales del siglo XV, y en diversas dependencias del importante monasterio de San

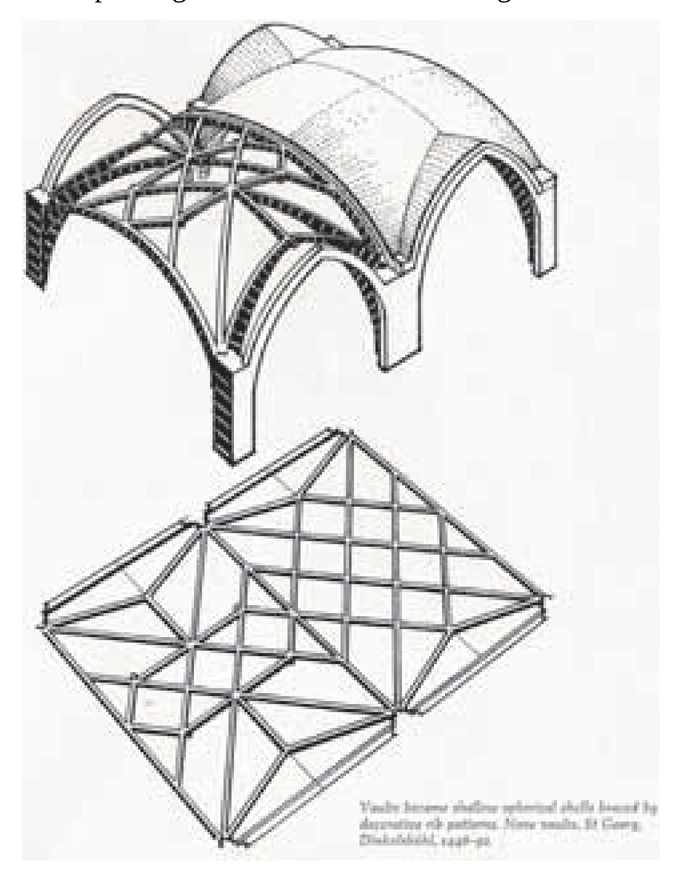


Fig. 10. Bóveda raticular formando geometrías esféricas en san Jorge de Dinkelsbühl (Alemania), según Acland.

Jerónimo de Cotalba, junto a Gandía. Una variante de estas bóvedas, con ladrillos tabicados y recortados a la vez, auténtica emulación al ladrillo del coetáneo arte de corte de piedras, se encuentra en la llamada tribuna de la reina María de Castilla en el monasterio de clarisas de la Trinidad de Valencia. Existen bóvedas de este tipo también en alguna dependencia del monasterio de clarisas de Pedralbes en Barcelona.

Las bóvedas tabicadas gozaron de notable fama en época posterior. Pero su mayor fortuna la consiguieron al adoptar formas esféricas a comienzos del siglo XVI. Con esta fórmula dejó de necesitar así las aristas o los nervios de piedra, independizándose totalmente de las bóvedas de crucería.

3. Los trasdosados: las cubiertas de madera y las cubiertas de argamasa aligerada

Nuevamente el imaginario colectivo de la arquitectura medieval nos remite a cubiertas inclinadas de gran pendiente construidas con grades estructuras de madera. Esto fue así en el centro y en el norte de Europa. Una abundante bibliografía ha divulgado esta solución. Pero no en todos los lugares sucedió así. En el Mediterráneo la persistencia de las tradiciones constructivas tardorromanas dio lugar a soluciones específicas.

La arquitectura romana de época imperial conoció un asombroso desarrollo de las construcciones abovedadas. Los cuarenta y tres metros de diámetro de la cúpula del Panteón de Roma o los veinticinco metros de luz de la nave principal de la basílica de Constantino no fueron superados en toda la Edad Media. Desde antiguo una amplísima serie de estudios ha dado a conocer estas bóvedas. De hecho, la historia de la construcción entendida como disciplina tiene en el libro de August Choisy, *L'Art de bâtir chez les Romains*, uno de sus textos fundamentales.



Fig. 11. Bóveda con arcos transversales del crucero de la catedral de Orihuela (Alicante). Fotografía de J. Bérchez.



Fig. 12. Trasdós de la bóveda del crucero de la catedral de Orihuela (Alicante).

Es sabido que los romanos construían arcos de ladrillo embebidos en la masa de hormigón de las bóvedas. Los arcos de ladrillo, al dividir la bóveda, facilitaban su construcción, conectaban jornadas de trabajo y formaban un conjunto homogéneo que trabajaba mecánicamente, de forma solidaria, con el resto de la bóveda. Esta técnica se utilizó para todas las formas de bóvedas que se construyeron en época imperial. Las disposiciones fueron muy variadas: las hay de cañón seguido, de arista, semiesféricas, de cuarto de esfera y gallonadas con diferentes perímetros.

Aunque es menos conocido, los romanos construyeron también bóvedas sobre arcos de resalto, o aparentes. Leopoldo Torres Balbás (1946) en un fundamentado (y poco divulgado) artículo dedicado a este tema propuso una notable cantidad de ejemplos que no habían sido considerados. La situación de estas bóvedas nervadas en locales secundarios explicaba su desconocimiento. Torres Balbás después de indicar que consideraba estas bóvedas «prólogo obligado al estudio de la arquitectura medieval, tanto de Oriente como de Occidente» señaló que:

> ... al gusto romano repugnaba la subdivisión de los abovedamientos, exigía aristas vivas y superficies continuas que decorar, por lo que ese procedimiento constructivo no llegó a infiltrarse en la plástica general de la bóveda de locales de cierta importancia. El procedimiento constructivo de dividir el espacio a cubrir por medio de arcos para facilitar el volteo de la bóveda permaneció casi invariable durante varios siglos. Lo que cambió, lo que se fue modificando con el tiempo y con el lugar geográfico fue el sentido plástico y decorativo, más sujeto siempre a las mudanzas de la sensibilidad humana que la técnica de la construcción.

La aparición de los arcos resaltados ocurrió, siguiendo de nuevo a Torres Balbás, cuando «los arquitectos armenios transformaron los modelos romanos hasta convertirlos en construcciones originales. Libertaron los arcos, empleados como apoyos de las bóvedas y cubiertas, de la servidumbre a la que los tuvo relegados la arquitectura imperial». Pero la arquitectura armenia no fue la única en renovar las tradiciones constructivas romanas, en la arquitectura del califato cordobés ocurrió otro

tanto. La aparición de las bóvedas nervadas en la arquitectura del occidente europeo a partir del siglo XI se produce a partir de las tradiciones latentes, pero también de otras muchas experiencias entremezcladas entre las que es difícil distinguir su procedencia inmediata.

Bóvedas de argamasa aligerada en época imperial y bizantina

Las bóvedas de hormigón romano vertido iban, en ocasiones, aligeradas con piedra pómez o mediante la inclusión de ánforas de cerámica en la masa. Estas piezas de cerámica unían a la función de aligerar peso, la de mejorar el rendimiento mecánico de las bóvedas. Cada una de ellas, por su geometría de revolución, formaba una pequeña bóveda que actuaba como un arco natural o de descarga. Permitían, igualmente, conectar los macizos de argamasa de cal dispuestos en sucesivas tongadas. Ejemplos bien conocidos de esta técnica, son el *caldarium* de las termas de Caracalla, (una rotonda de 34 metros de diámetro) construida en 212-217, el llamado «Templo de la Minerva Médica» o ninfeo de los *Horti Liciniani* (263-324) y el mausoleo de Santa Elena (328), todos ellos en la ciudad de Roma.

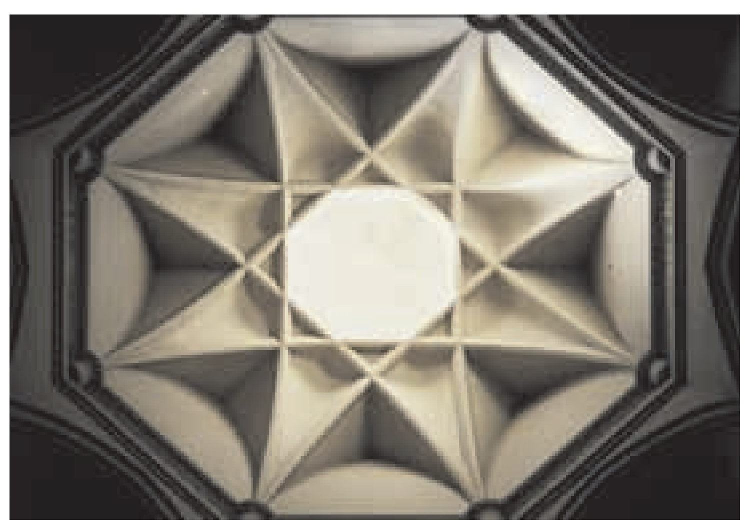


Fig. 13. Bóveda de arcos cruzados, o transversales, de una capilla de la iglesia de San Pablo de Zaragoza.

Los bizantinos persistieron en la utilización de este sistema constructivo. Al parecer el mausoleo de Gala Placidia en Ravenna está formado por bóvedas de ladrillo dispuesto a sardinel con las enjutas rellenas de ánforas embebidas en mortero de cal. La arquitectura bizantina en su afán por conseguir bóvedas más ligeras y con menos empujes llegó a sustituir los ladrillos por tubos cerámicos enchufados. Esta técnica está todavía viva en Túnez y en Argelia. La célebre iglesia de San Vital de Ravenna (526-547), formada por una cúpula de 16,90 metros de diámetro, fue construida mediante este sistema.

Bóvedas de crucería y argamasa aligerada en época medieval

Almacenadas en los depósitos y repartidas por los pasillos de los museos y de las grandes construcciones abovedadas medievales del Mediterráneo es frecuente

encontrar vasijas cerámicas procedentes de las bóvedas de estos edificios. La ausencia de métodos arqueológico-constructivos en su extracción impiden trazar el itinerario preciso de este tipo de abovedamientos desde la antigüedad tardía hasta la Edad Media.

No obstante, cabe pensar que la síntesis de la bóveda de crucería con la técnica de la argamasa aligerada debió de producirse tras los primeros contactos entre las culturas que les daban soporte. Estos se produjeron en los estados latinos de Oriente y en la arquitectura federiciana durante el siglo XIII. De hecho, Camille Enlart (1899), que alcanzó a ver las bóvedas de las iglesias góticas de Chipre arruinadas, señaló cómo tras la plementería de piedra estaban los macizos de argamasa aligerada con cerámica. La catedral de Nicosia (a partir de 1210) tiene las cubiertas planas por lo que debe de seguir esta técnica. El castillo-palacio de Federico II en Siracusa, Castelmaniace (*ca*. 1230), está formado por un gran salón columnario cubierto por bóvedas de crucería y terrazas. Los senos de las bóvedas, según información verbal de sus restauradores, estaban formados por argamasa aligerada con cerámica.

Los rellenos de argamasa aligerada sobre bóvedas de crucería debían ser habituales en la arquitectura gótica mediterránea del siglo XIV. El arquitecto conservador de la catedral de Barcelona, Juan Bassegoda Nonell (1978), relata que durante una restauración de las bóvedas de la catedral de Barcelona en 1972 se hicieron unas calas bajo su dirección:

> Esto permitió comprobar que la estructura de la bóveda de la catedral está compuesta, de abajo arriba, por los siguientes estratos constructivos, primero los arcos fajones, torales y cruceros, segundo los témpanos de buena sillería labrada, tercero una gruesa capa de mortero de cal aligerada con *frentum*; cuarto, un espacio de forma decreciente a medida que se alza la bóveda lleno de espléndidas ánforas de gran tamaño colocadas en seco (las *gerres* de los libros de obra) y, quinto, una gruesa capa de hormigón aligerada nuevamente con *frentum* que disminuye su espesor hasta llegar al caballete donde es sólo de mortero de unos



Fig. 14. Bóveda de crucería de rampante recto de la iglesia de Sant Mateu (Castellón), siglo XIV.

quince centímetros de grosor. Por encima de este conjunto sólo quedaba, a la vista del curioso que quiera asomarse al terrado de la Seo, la solera de una sola hoja de ladrillo recibida con mortero de cal.

Según el mismo autor,

Este examen permitió comprender que la bóveda de piedra quedaba grandemente reforzada y cohesionada por la primera capa de mortero, que la gran pendiente entre bóveda y terrado se ganaba con las ánforas que sin peso de consideración llenaban un hueco considerable y eran estables al quedar encajadas y que, por encima, existía una nueva bóveda de hormigón de cal aligerada con orzas según el más puro estilo de las bóvedas romanas de los tiempos de Adriano o Constantino. Esta segunda bóveda de hormigón era capaz de soportar su peso propio y el de la cubierta de ladrillo además de la sobrecarga de nieve o de tránsito y, por lo tanto, era un elemento estructural capaz de mantener a cubierto la catedral aún en el caso de que se viniera abajo la bóveda pétrea.

La descripción de la bóveda de la catedral de Barcelona no es la única de la que disponemos. Afortunadamente, el mismo profesor Juan Bassegoda Nonell recoge las descripciones de los análisis practicados en las bóvedas de las iglesias de Santa María del Mar y de Santa María del Pino, ambas igualmente en Barcelona:

En abril de 1934, una antigua grieta en el segundo tramo de la iglesia parroquial de Santa María del Mar, provocó una consulta técnica en la que informaron tres arquitectos: Buenaventura Bassegoda Musté, Luis Bonet Garí, y Francisco Guardia Vial, quienes ordenaron fuera practicada una cala desde la azotea en la parte alta de la bóveda. Esta inspección dio como resultado la

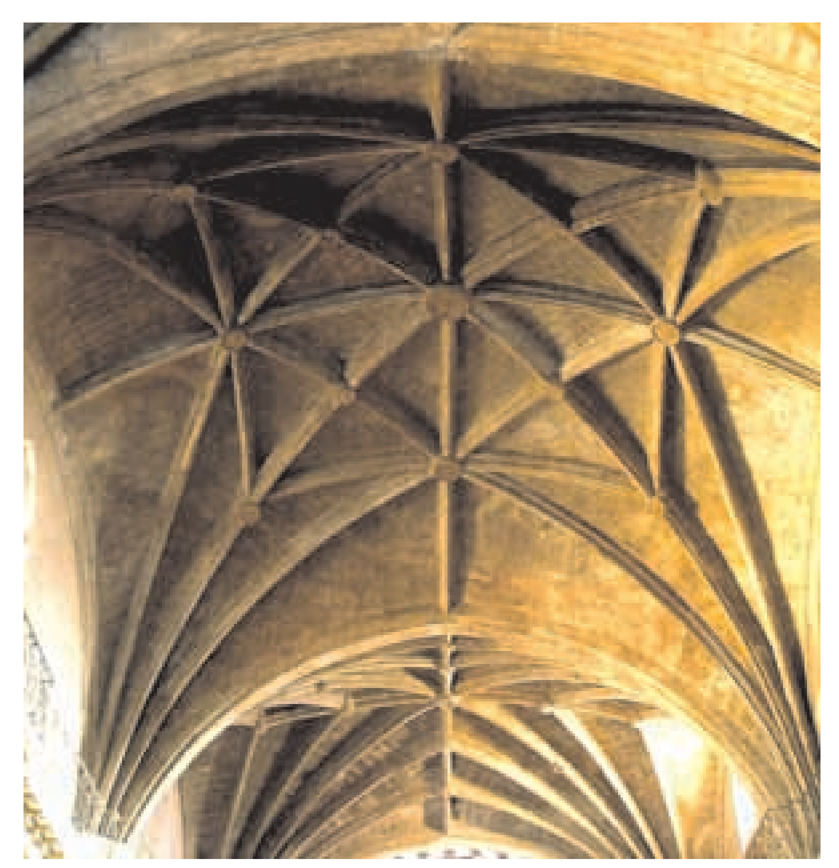


Fig. 15. Bóveda de crucería de rampante redondo de la iglesia de santa María de Onteniente (Valencia). Fines del siglo XV y comienzos del siglo XVI.

determinación de las siguientes capas o estratos en la bóveda: primero el tablero tabicado de la azotea, luego una capa de mortero de cal para formar las pendientes que debían recibir el solado, después un relleno de alfarería hueca englobada en argamasa, una nueva capa de calcina y finalmente, la bóveda de piedra, cuya grieta se mostró poco o nada peligrosa. Esta perforación se hizo en la parte más delgada de la bóveda, cerca de la clave, y supone, en aquel lugar, un grueso no inferior a 60 cm. Sin contar la piedra labrada del témpano.

con todo, siguiendo al mismo autor:

La prueba de esta mayor capacidad resistente se halló en el caso insólito y peregrino de las bóvedas de la capilla de la Purísima Sangre en la iglesia del Pino. Según la descripción del arquitecto Angel Truñó Rusiñol, que intervino en la restauración, cayó la bóveda de piedra después del incendio intencionado de julio de 1936, quedando, sin embargo, en su sitio el mazacote de hormigón, y a través del agujero se podía ver y así lo muestran las fotografías, las ollas y el hormigón como si fuera la Tor Pignatara de Roma».

Debe, por tanto, concluirse que si las bóvedas del gótico del norte han llegado a mantenerse sin nervios tras los bombardeos, las del gótico mediterráneo, en similar situación, lo han hecho sin nervios y sin plementería. Las descripciones del profesor Bassegoda sobre las bóvedas de las iglesias góticas de Barcelona podrían ampliarse a todo el ámbito del gótico mediterráneo. El mismo autor cita las bóvedas de la iglesia del monasterio de Pedralbes y de la catedral de Tortosa.

En tierras valencianas pueden señalarse dos casos significativos recientemente prospectados: la capilla del Carmen de la antigua parroquia de Villafamés y el coro alto de la iglesia arciprestal de Morella. La primera de ellas es una capilla de pequeña dimensión, de planta cuadrada, con crucería simple, datable a mediados del siglo XIV. Para su construcción se aprovecharon los muros de una torre de la cerca islámica. Cuando se levantó la cubierta de teja para hacer la cala, pudo verse un fortísimo conglomerado de cántaros y argamasa de cal. El conjunto era imposible de romper sin utilizar el pico. Lo más curioso era que la adecuada dimensión y disposición de las vasijas debió permitir la construcción por etapas de esta bóveda aligerada.

El coro de la iglesia arciprestal de Morella es de planta sensiblemente cuadrada y se dispone en alto, a 5,5 metros del pavimento, sobre cuatro pilares aislados, en un tramo central de la nave. Para su sustento se construyó una bóveda nervada cuyas costillas forman, básicamente, un octógono estrellado que se cierra con claves bellamente labradas. En algunas de ellas se representan doseles al modo de los que se utilizaban para cubrir imágenes y que son microarquitecturas similares a maquetas de bóvedas de crucería. El número de claves de la bóveda es trece. El perfil de la bóveda es rebajadísimo. Los arcos torales, que no son apuntados sino circulares rebajados, tienen 50 centímetros de flecha para 10,70 metros de luz y apean sobre los pilares construidos en el siglo XIII, es decir, más de cien años antes. En este caso las calas efectuadas han permitido comprobar que sobre la plementería se extiende una capa de argamasa de cal aligerada con una ligerísima toba calcárea que recuerda la piedra pómez. El grueso de la losa de argamasa aligerada sobrepasa los 50 o 60 cm sobre la clave, que es la parte más delgada. Cabe pensar, por lo tanto, que la

bella bóveda estrellada de crucería, de perfil rebajado, no es más que un encofrado perdido autosustentante de la auténtica bóveda de hormigón aligerado a la romana.

Aunque no se han descrito, las bóvedas de crucería y de arista fabricadas con argamasa en Nápoles y en la Campania, (patria de la famosa puzolana), deben ser herederas directas de las técnicas romanas. La pequeña dimensión de las claves, o incluso la inexistencia de nervios en estas bóvedas, así lo hacen pensar. Significativa muestra de lo dicho es la bóveda de la capilla mayor de la iglesia de la Anunciata de Carinola (s. XV). En esta iglesia la bóveda de arista aparece con los nervios y la clave pintados al no existir estos.

El análisis estructural de las bóvedas de hormigón aligerado medievales indica que, en ocasiones, este material es un elemento resistente y no sólo un producto de relleno. La consistencia del hormigón aligerado puede permitir en muchos casos que las cargas sean verticales, reduciendo los empujes horizontales, y aligerando el trabajo de los contrafuertes o de los arbotantes. Este hecho, unido a la eliminación del peso, nada despreciable, de las armaduras de madera y de las cubiertas de teja o de piedra ha podido permitir muchos alardes técnicos del gótico mediterráneo. La documentación de archivo señala la frecuencia con la que el maestro mayor acude a las cubiertas para reponer la cal lavada con las lluvias. Es evidente que en estas bóvedas las labores de mantenimiento de reposición de la cal no eran una cuestión menor sino un problema estructural. Las modernas «inyecciones de cal» en la restauración de obras de fábrica son el equivalente de las medievales *lletades de cals*, o lechadas de cal, realizadas sobre las bóvedas del gótico mediterráneo.

Sistema completamente diverso desde el punto de vista de la mecánica estructural es aquel que resuelve la cubierta de las bóvedas rellenando los senos de estas con recipientes cerámicos en seco, o asentados con tierra. En esta solución las ollas llenan de la forma más ligera y económica posible el espacio comprendido entre las bóvedas y el piso superior, las terrazas, o las cubiertas. Su única función estructural, de estar ajustadas, sería transmitir el empuje de los riñones o caderas de la bóveda a los muros.

Estos rellenos de cerámica están ampliamente documentados en toda el área mediterránea desde el siglo XIV y no solamente en la Koiné aragonesa. Una reciente exposición realizada por el museo del Carmine de Siena ha estudiado un relleno de este tipo realizado con piezas de alfar de desecho, tomadas con tierra y dispuestas boca abajo para impedir que tomaran humedad.De esta solución se hizo eco León Bautista Alberti en su obra *De Re Aedificatoria* (1452). En ella, después de indicar que los antiguos acostumbraban a rellenar los espacios intermedios de las bóvedas de hormigón y de piedra pómez, dice que:

> hacen bien quienes, para aliviar la carga, colocaron por toda la superficie de las caderas vasijas de agua vacías, rajadas y boca abajo, para que no aumenten de peso por la humedad allí recogida, y echaron encima conglomerado de piedra muy ligera pero resistente.

En realidad, la mayor o menor cantidad de argamasa de cal hizo que las soluciones intermedias fueran numerosas. La excavación arqueológica de las bóvedas de

la iglesia de santa María de Alicante (s. XV) es una de las escasísimas ocasiones en las que la renovación de la cubierta ha ido precedida de un análisis rigurosamente científico de los materiales de la bóveda. En este caso los arqueólogos mostraron que cada tramo se construyó con maestría y criterios constructivos diferentes. En estas bóvedas la función mecánica de la cerámica, por el lavado de la argamasa, o por su ausencia, era ya nula. Los rellenos de cerámica no se limitaron a las costas del Mediterráneo ni finalizaron en la Edad Media. Su extensión a Castilla, a Portugal y América en el siglo XVI, las dotó de una larga duración. Los numerosos ejemplos de cubiertas formadas con rellenos de vasijas cerámicas en Cuba, Puerto Rico, República Dominicana y México así lo avalan.

4. Otras bóvedas medievales

El desarrollo de las bóvedas de crucería a partir de la segunda mitad del siglo XII en los dominios reales franceses provocaría un nuevo capítulo en el desarrollo de la estereotomía y, a la vez, en la historia del dibujo arquitectónico. El control del espacio se simplificaba resolviendo los encuentros de las superficies de las bóvedas mediante arcos previamente diseñados. Esta nueva formulación requería el uso de proyecciones sobre los planos vertical (a plomo) y horizontal (a nivel). Con ello el sistema diédrico encontró un problema de entidad en el que emplearse a fondo.

Pero es a partir de fines del siglo XIV cuando una fiebre de audaz investigación técnica renueva el panorama de la construcción occidental. Resulta asombroso pensar cómo de forma simultánea se estuvieron construyendo en Europa los conoides de las bóvedas de abanico del *Perpendicular English*; las bóvedas reticulares, o las de nervios curvos, de complejas geometrías, del *Spätgotik* germánico; las bóvedas diamantinas o alveolares, plegadas en arista con el criterio de estructura-forma, de Sajonia, Bohemia, Polonia o Lituania; las bóvedas gallonadas, de arista, o de esferas intersectadas del *Quattrocento* toscano o romano (sin olvidar los aparejos de doble hoja autoportantes de Brunelleschi) o las bóvedas de crucería con plementerías caladas del tardogótico castellano. No es de extrañar que el dibujo arquitectónico conociera un auge sin precedentes. Todos estos abovedamientos parecen derivar de las plementerías de doble curvatura experimentadas al realizar las bóvedas de crucería. No obstante, muchas de estas experiencias no dependen ya de los arcos de crucería que servían de directriz para el trazado de las superficies. En algunos casos como las bóvedas de abanico, las plegadas y las aristadas, los nervios no existen y mantener el nombre de bóvedas de crucería es absurdo.

Las arquitecturas de la Corona de Aragón, ancladas en las viejas tradiciones constructivas mediterráneas, derivaron la investigación técnica hacia una original confluencia del viejo y mediterráneo arte de corte de piedras, del nuevo uso de proyecciones de raíz occidental y de la nueva presencia de superficies regladas y de doble curvatura. Estas aplicaciones darán lugar a la estereotomía moderna. En este contexto parece ser la arquitectura valenciana la que resume, desarrolla y difunde, a

lo largo del siglo XV, una amplia serie de novedosas aplicaciones geométricas. Entre ellas se encuentran las bóvedas aristadas y las de arcos transversales.

5. Las nuevas geometrías: el rampante recto frente al rampante redondo

A finales del siglo XV, las prácticas bóvedas de crucería eran ya una antigua y experimentada solución. Frente a ellas las nuevas bóvedas aristadas, en las que la arista y el plemento forman un sólo cuerpo, nacían llenas de sugerentes posibilidades de expresión formal y ponían explícitamente en cuestión el valor estructural de la crucería. Su inconveniente estribaba en que requerían el control estereotómico simultáneo de las tres dimensiones y la previa descripción científica del espacio.

Fue tarea de la generación personalizada en el espacio valenciano por Pere Compte la de desarrollar un sistema fácilmente descriptible y transmisible: la geometría de la esfera. Esta geometría se aplicó por igual a las bóvedas masivas de piedra y a las bóvedas de crucería. La aplicación del nuevo sistema conllevó revolucionarias consecuencias: el progreso de la estereotomía moderna y los nuevos tipos de bóvedas de crucería. En estas últimas comienzan a sustituirse las pesadas plementerías de piedra y argamasa por otras con finos plementos de ladrillo tabicado o por calotas aligeradas con piedras de baja densidad como las llamadas de *quesillo* o de *pedra mortina*.

La nueva disposición de abovedamientos tendría su paralelo en Castilla. Las bóvedas masivas de piedra con estudiado corte de piedra tuvieron un pronto y espectacular desarrollo en los focos renacentistas de la diócesis de Cartagena y en Andalucía. Respecto a las bóvedas de crucería, el profesor Chueca (1951) ya indicó cómo en la catedral de Salamanca, en 1522, se debatía entre la construcción de bóvedas con rampante llano o con rampante redondo. El nervio rampante o tercelete (especialmente el situado en la línea del espinazo de la bóveda) señala la diferencia entre los abovedamientos de plementería plegada, característicos del gótico clásico, y los de plementería continua, característicos de la arquitectura española del siglo XVI. El citado profesor Chueca señaló que en la documentación correspondiente a la construcción de la catedral de Salamanca, respecto al trazado de las bóvedas:

> Lo que más preocupaba a los maestros era precisamente su rampante. En esto se dividen unos y otros, formando como dos grupos o tendencias, que podríamos llamar nosotros el tradicional, inclinado hacia el poco rampante, «rampante llano», y el moderno, partidario del «rampante redondo»... Los representantes de la escuela que pudiéramos llamar moderna se inclinan, como se ve, por considerar que la resistencia de las bóvedas reside más bien en la propia curvatura del cascarón de la plementería que en la fuerza de los nervios; es decir, más en la estructura continua de tendencia esferoidal que en el andamiaje de los arcos... De esta bóveda hasta la bóveda vaída lisa ya sólo hay un paso: la estructura continua existe de hecho, tanto en uno como en otro caso; los nervios, solidarizados completamente con el cascarón de los plementos, trabajan, una vez terminada la bóveda, sin tensión mecánica diferenciada, dentro de la continuidad de la estructura;

por consiguiente, su misión es esencialmente decorativa y pueden ser suprimidos, dejando el cascarón esférico liso sin que sufra el equilibrio mecánico de la bóveda. Este paso se salva en la arquitectura española en el comienzo de nuestro renacimiento, enlazando directamente, más que nada, en lo constructivo, con el último arte gótico».

Abovedamiento ya perfectamente documentado es el correspondiente a la Sala de Contratación de la Lonja de Valencia. Este espacio quedó cubierto entre 1492 y 1498. Las bóvedas de esta Sala se tienden sobre tramos cuadrados y columnas entorchadas. El contraste con las bóvedas de la Lonja de Mallorca que, como frecuentemente se ha señalado, pudo servir de modelo en lo tipológico, no puede ser más expresivo. Frente al tradicional rampante llano de Mallorca, las bóvedas valencianas exhiben un rampante redondo que permite la multiplicación de nervios y claves; los nervios forman una doble retícula por tramo reforzada con nervios diagonales en cada cuadrado. Las claves llegan al número de nueve por tramo incluidas las situadas en los arcos formeros. Aunque estos arcos parezcan ligerísimamente apuntados, las bóvedas son de evidente tendencia esferoidal. Para adecuarse más claramente a su forma de trabajo, el aparejo de la plementería, en la parte central de la bóveda, se cierra ortodoxamente como una bóveda esférica por hiladas cuadradas. Que las bóvedas de la Lonja fueron leídas como bóvedas vaídas lo demuestra el grabado de Lagier, que muestra el interior de la Lonja, publicado en el *Voyage Pittoresque a l'Espagne* de Alexandre de Laborde (París, 1811). En este grabado las bóvedas se muestran como perfectas bóvedas vaídas (aunque no lo sean exactamente) en las que los nervios se han reducido a una línea decorativa. El rampante redondo del abovedamiento de la Sala de Contratación de la Lonja de Valencia es, por sus características, uno de los primeros de la arquitectura española. Una prueba suplementaria del trabajo independiente de los nervios y la plementería en las bóvedas de rampante redondo se tuvo durante la reciente restauración (2006) de las bóvedas de esta sala. La inspección desde lo alto de los andamios permitió constatar que algunos nervios estaban claramente separados de las plementerías. Esta comprobación pudimos hacerla gracias al arquitecto de la obra, y amigo, Manuel Ramírez.

Bóveda de disposición curiosísima, insuficientemente estudiada y divulgada, es la que cubre el tramo del crucero de la catedral de Orihuela. Esta bóveda cubre un espacio rectangular de 20 por 13 metros aproximadamente, que es el equivalente a los dos tramos, de tres naves, de la pequeña catedral que, hacia 1506, se convirtieron en un espacio único. Frente a la crucería simple y tradicional en Orihuela un arco oval atraviesa el rectángulo en su dimensión más amplia y otros dos se cruzan con éste en la dirección más corta. Cada uno de los seis rectángulos formados (en proyección) lleva, como la Lonja de Valencia, nervios diagonales. El despiece de la plementería hace que esta se cierre por hiladas cuadradas (como en la Lonja) alrededor de las dos principales claves. El abombado perfil de esta bóveda cambia en el perímetro para enlazar con los tramos existentes de tres naves y con la capilla mayor. La bóveda del crucero de la catedral de Orihuela, resuelta con arcos transversales, tuvo un curioso eco en algunos abovedamientos del siglo XVI. Una de las bóvedas del deambulatorio de la catedral de Salamanca recurre a la misma solución. Lo mismo hace el gran crucero de la iglesia del monasterio de los Jerónimos de Lisboa. El epi-

sodio de los cimborrios aragoneses, resueltos con arcos cruzados, podría tener su paralelo, o uno de sus precedentes, en las bóvedas de arcos transversales estas experiencias tardomedievales.

6. Nota bibliográfica: Introducción a una bibliografía sobre la historia de la construcción en la Europa medieval

El estudio de la historia de la construcción medieval despertó un temprano interés. Así lo demuestra, ya en el siglo XIX, la extensa y original obra de E. Viollet-le-Duc y de R. Willis. La Historia de la Construcción, como disciplina, ha conocido en los últimos tiempos un asombroso desarrollo. Las causas que han motivado el interés han sido muy diversas: la construcción, la restauración arquitectónica, la arqueología y una forma más amplia de mirar la historia están entre ellas. Como resultado, antiguos autores como A. Frezier, J. Rondelet, E. Viollet-le-Duc o A. Choisy vuelven a traducirse y reeditarse. No es de extrañar que esta disciplina haya vuelto de la mano de la nueva arqueología muraria, de las numerosas restauraciones que se realizan actualmente, de las modernas y poderosas herramientas para el levantamiento de planos y, por supuesto, del interés de las fábricas entendidas como documento. El resultado es una bibliografía extensísima y dispersa de difícil control.

En España debe subrayarse la labor admirable y modélica realizada por la Sociedad Española de Historia de la Construcción, que ha celebrado varios congresos nacionales e internacionales. Las actas, puntualmente publicadas, son pieza esencial para comprobar el desarrollo de la disciplina. Lo mismo sucede con las publicaciones realizadas de autores clásicos. Las actividades desarrolladas por esta asociación, puede encontrarse en http://www.sedhc.

Véase también por su carácter general, otros sitios web:

http://orgs.uww.edu/avista/
http://www.constructionhistory.co.uk/
http://www.mcah.columbia.edu/html/medieval.html
http://www.gothicmed.com

El profesor Enrique Rabasa ha publicado una exhaustiva bibliografía sobre cantería en: www.Artifexbalear.org

Los criterios de selección de la bibliografía que se adjunta a continuación han sido el interés específico de los textos y la accesibilidad de los mismos. Evidentemente no se trata de un repertorio exhaustivo. No obstante, todas las obras citadas se consideran de necesaria o, al menos, conveniente consulta para una introducción a la historia de la construcción medieval. Todas ellas son de fácil acceso desde una buena biblioteca universitaria. Aunque se han clasificado en tres apartados. 0. Obras Generales; 1. Mecánica Estructural; 2. El obrador medieval; 3. Dibujo, los contenidos con frecuencia se cruzan.

O. GENERALES

BUCHER, François, «Micro-Architecture as the idea of Gothic Theory and Style». *Gesta*, vol. XV (1 y 2), 1976.

CONFORTI, Claudia, *Lo Specchio del cielo, forme significati technique e funzioni della cupola del Pantheon al Novecento*, Milán, 1997.

CHOISY, Auguste, *Histoire de l'Architecture*. París, 1899.

FLETCHER, Banister, *Historia de la arquitectura por el método comparado*. Londres, 1896. La edición española se publicó en 1928 por la Editorial Canosa. Existe una edición facsímil de Ediciones Giner, Madrid, 1985. En la edición española colaboró Andrés CALZADA.

GIMPEL, Jean, *The Medieval Machine, The Industrial Revolution of the Middle Ages*, Londres, 1976.

HARVEY, *The Perpendicular style*, Londres, 1978.

GÓMEZ MARTÍNEZ, Javier, *El gótico español de la Edad Moderna. Bóvedas de crucería*, Valladolid, 1998.

ICHER, François, *Les Compagnons ou l'amour de la belle ouvrage*, París, 1995.

KNOOP, Douglas y JONES, G.P, *The Medieval Mason, An Economic History of English Stone Building in the later Middle Ages and Early Modern Times*, Manchester, 1967.

KOSTOFF, Spiro (ed.), *The Architect. Chapters in the History of the Profession*, 1977. Edición castellana *El arquitecto: historia de una profesión*, Madrid, 1977.

LAMPÉREZ, Vicente, *Historia de la Arquitectura Cristiana Española*, Madrid, 1930.

RADDING, Charles M. y CLARK, William N., *Medieval Architecture, Medieval Learning. Builders and Masters in the Age of Romanesque and Gothic*, New Haven and London, 1992.

RADOVI, Milada a Oldrich, *Knila o Sklípkových Klenbách*. Praga, 1998.

WILSON, Cristopher, *The Gothic Cathedral*. Londres, 1992.

ZARAGOZÁ CATALÁN, Arturo, *Arquitectura gótica Valenciana, siglos XIII-XV*, Valencia 2000.

1. MECÁNICA ESTRUCTURAL

ABRAHAM, Pol, *Viollet-le-Duc et le rationalisme medieval*, París, 1934.

HEYMAN, Jacques, *Teoría, historia y restauración de estructuras de fábrica*, Madrid, 1995.

HEYMAN, Jacques, *El esqueleto de piedra. Mecánica de la arquitectura de fábrica*, Cambridge 1995. Edición castellana en Instituto Juan de Herrera. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, 1999.

HUERTA, Santiago, *Arcos, Bóvedas y Cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica*, Madrid, 2004.

MARK, Robert, *Experiments in Gothic Structure*. M.I.T. Press, 1982. Existe un breve resumen en castellano en: *Experimentos sobre estructuras góticas*. MARK, Robert y WILLIAM W. Clark, *Investigación y Ciencia*. Edición española de Scientific American, enero 1985, pp. 92-100.

MARK, Robert (editor), *Tecnología arquitectónica hasta la revolución científica. Arte y estructura de las grandes construcciones*, Madrid, 2002.

TORRES BALBÁS, Leopoldo, «Las teorías sobre la arquitectura gótica y las bóvedas de ojivas», *Las Ciencias*, año IV, nº 1, Madrid, 1939.

TORRES BALBÁS, Leopoldo, «Función de nervios y ojivas en las bóvedas góticas». *Investigación y Progreso*, Madrid, 1945.

TORRES BALBÁS, Leopoldo, «Bóvedas romanas sobre arcos de resalto» *Archivo Español de Arqueología*, nº 64 (1946).

2. EL OBRADOR MEDIEVAL. HISTORIA, TÉCNICAS Y ANÁLISIS CONSTRUCTIVOS

ACLAND, J, *Medieval Structure: The Gothic Vault*. Toronto, 1972.

ALMUNI BALADA, Victoria, *La catedral de Tortosa als segles del gòtic*, 2 vols, Benicarló, 2007.

ARAGUAS, Philippe, *Brique et Architecture dans l'Espagne Médiévale (XIIe-XVe siècle)*, Madrid, 2003.

BARRAL i ALTET, Xavier, *Artistes, Artisans et Production Artistique au Moyen Age*. Actas del coloquio internacional en Rennes, 2-6 mayo 1983, 3 vols., París, 1987.

BASSEGODA NONELL, Juan, *La cerámica popular en la arquitectura gótica*, Barcelona, 1978.

BECHMANN, Roland, *Les racines des cathèdrales, l'arquitecture gothique, expresion des conditions du milieu*, París, 1984.

BECHMANN, Roland, *Villard de Honnecourt. La pensée technique au XIIIe siècle et sa comunication*, París, 1991.

BINDING, Günther, *Baubetrieb im Mittelalter*. Primus Verlag. Darmstadt, 1977.

CALVO LÓPEZ, José, ALONSO RODRIGUEZ, Miguel Ángel, RABASA DÍAZ, Enrique y LÓPEZ MOZO, Ana, *Cantería Renacentista en la catedral de Murcia*, Murcia, 2005.

CASINELLI, Roberto (editor), *Talleres de Arquitectura en la Edad Media*. Barcelona, 1995.

CASTELLNOVO, Enrico, (editor), *Artifex Bonus. Il mondo dell'artista medievale*, Laterza, 2004.

CHUECA GOITIA, Fernando, *La catedral nueva de Salamanca*, 1951.

COLDSTREAM, Nicola, *Masons and Sculptors*, Londres, 1991.

COLOMBIER, Pierre du, *Les chantiers des cathédrales*, París, 1973.

COPPOLA, Giovanni, *Ponti medievali in legno*, Laterza, 1996.

DOMENGE i MESQUIDA, Joan, *L'obra de la Seu. El procés de construcció de la catedral de Mallorca en el tres-cents*, Palma de Mallorca, 1997.

ENLART, Camille, *Manuel d'Archéologie française depuis les temps mérovingiens jusqu'à la Renaissance*, París, 1929.

ERLANDE BRANDENBOURG, Alain, *Quand les cathédrales étaient peintes*, Paris, 1994.

ESPAÑOL i BERTRÁN, Francesca, «Los materiales prefabricados gerundenses de aplicación arquitectónica (siglos XIII-XV», Actas. *L'Artista-Artesà medieval a la Corona d'Aragó, 14, 15 i 16 de enero de 1998*, Lérida, 1999, pp. 77-127.

ESPAÑOL i BERTRÁN, Francesca, «L'Escultura en Guix a Catalunya en Època Gótica», *Congrés d'Història de l'Esglesia Catalana* (desde los orígenes hasta ahora), pp. 671-695.

FITCHEN, John, *The construction of gothic cathedrals*, Oxford, 1961.

FRANKL, Paul, «The secret of the medieval masons» y PANOFSKY, Erwin, «An explanation of Stornaloco's formula», *The Art Bulletin*, 1945.

GARCÍA-G. MOSTEIRO, Javier (editor), *Cuaderno de apuntes de construcción de Luís Moya (curso 1924-1925)*, Madrid, 1993.

GIMPEL, Jean, *Les bâtisseurs de cathédrales*. París, 1958.

GRACIANI, Amparo (editor), *La técnica de la Arquitectura Medieval*, Sevilla, 2001.

GÓMEZ-FERRER LOZANO, Mercedes, «Las bóvedas tabicadas en la arquitectura valenciana durante los siglos XIV, XV y XVI», *Una arquitectura gótica mediterránea*, MIRA, Eduardo y ZARAGOZÁ CATALÁN, Arturo (editores), pp. 135-150, Valencia, 2003.

HEWETT, Cecil A, *English Historic Carpentry*, Philhimore, 1980.

JIMENEZ MARTÍN, Alfonso (ed.), *La piedra postrera, V centenario de la catedral de Sevilla*. Ponencias del *Simposium internacional sobre la catedral de Sevilla en el contexto del gótico final*. Sevilla, 2007.

KARGE, Henrik, «La cathédrale de Burgos. Organisation et technique de la construction», *Les bâtisseurs des cathédrales gothiques*, Estrasburgo, 1989, pp. 139-163.

KIMPEL, Dieter, «Le développement de la taille en série dans l'architecture médiévale et son rôle dans l'histoire économique», *Bulletin monumental*, nº 135 (1977), pp. 195-122.

KIMPEL, Dieter, «L'apparition des éléments de série dans les grands ouvrages», *Dossiers Histoire et Archéologie*, nº 47, noviembre 1980, pp. 40-59.

MARÍAS, Fernando, «Piedra y ladrillo en la arquitectura española del siglo XVI», *Les Chantiers de la Renaissance*. Actes des colloques tenus à Tours en 1983-84, pp. 71-83, Paris, 1991.

MARTÍNEZ DE AGUIRRE ALDAZ, Javier, *Arte y Monarquía en Navarra 1328-1425*, Pamplona, 1987.

MARTÍNEZ DE AGUIRRE, Javier y GIL CORNET, Leopoldo, *Torres del Río, Iglesia del Santo Sepulcro*, Pamplona, 2004.

MENCL, Vàclav, *Českě Stredoveke Klenby*, Praga, 1974.

MESQUI, Jean, *Le pont en France avant le temps des ingénieurs*. París, 1986.

MIRA, Eduardo y ZARAGOZÁ CATALÁN, Arturo (eds.), *Una arquitectura gótica mediterránea*, 2 vols., Valencia, 2003.

NAVARRO FAJARDO, Juan Carlos, *Bóvedas de la arquitectura gótica valenciana*, Valencia, 2006.

NOBILE, Marco Rosario, BARES, María Mercedes y ZARAGOZÁ CATALÁN, Arturo, «La Scala detta vis de Saint-Gilles nel Mediterráneo», *Lexicon, storie e architettura in Sicilia*, nº 4, Palermo, 2007

NUERE, Enrique, *La carpintería de lo blanco*, Madrid, 1985.

NUERE, Enrique, *Carpintería de Armar Española*, Madrid, 1989.

PALACIOS, José Carlos, *Trazas y Cortes de Cantería en el Renacimiento Español*, Madrid, 1990 y 2003.

RABASA DÍAZ, Enrique, *Forma y construcción en piedra, de la cantería medieval a la estereotomía del siglo XIX*, Madrid, 2000.

RABASA DÍAZ, Enrique, «Principios y construcción de las bóvedas de crucería», *Loggia*, nº 20, pp. 86-87, Valencia, 2008.

RECHT, Roland (editor), *Les bâtisseurs des cathédrales gothiques*, Estrasburgo, 1989.

RODRÍGUEZ ESTÉVEZ, Juan Clemente, *Cantera y obra, las canteras de la Sierra de San Cristóbal y la catedral de Sevilla*, El Puerto de Santa María, 1998.

SAKAROVITCH, Joël, *Épures d'architecture: de la coupe des pierres à la géométrie descriptive XVI-XIX siècles*, Birkhäuser, 1998.

SHELBY, Lonnie, «Medieval masons' tools: the level and the plumb rule», *Technology and culture*, vol. II, 1961, pp. 127-130.

SHELBY, Lon R, «Medieval Masons' Templates», *Journal of the Society of Architectural Historians*, vol. XXX, nº 2 (mayo 1971), pp. 140-154.

SHELBY, Lon R, «Setting cut the Keystones of Pointed Arches: A Note on Medieval Baugeometrie», *Technology and Culture*, vol. 10 (1969), pp. 537-548.

VIOLLET-LE-DUC, Eugène E., *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XI au XVI siècle*, 10 vols., París, 1854-1868.

WHITE, Lynn, *Tecnología medieval y cambio social*. 1ª ed., Oxford, 1962, ed. española, Barcelona, 1990.

WILLIS, Robert, «On the Construction of the Vaults of the Midle Ages», *Royal Institute of British Architects of London*, vol. I, part. II, Londres, 1842.

YARZA, Joaquín y FITÉ, Francesc (eds.), *L'Artiste-Artesà Medieval a la Corona d'Aragó*, Actas del congreso celebrado en Lérida del 14 al16 de enero de 1998, Lérida, 1999.

ZARAGOZÁ CATALÁN, Arturo e IBORRA BERNAD, Federico, «Otros góticos: Bóvedas con nervios de ladrillo aplantillado y de yeso, nervios curvos, claves de bayoneta, plementerías tabicadas, cubiertas planas y cubiertas inclinadas», *Historia de la Ciudad* IV, Valencia, 2005, pp. 70-88.

ZARAGOZÁ CATALÁN, Arturo y GÓMEZ-FERRER LOZANO, Mercedes, *Pere Compte, arquitecto*, Valencia. 2007.

ZARAGOZÁ CATALÁN, Arturo, «La capilla real del antiguo Monasterio de Predicadores de Valencia», *La Capella Reial d'Alfons el Magnánim...*, pp. 14-59., Valencia. 1977.

3. DIBUJO

BUCHER, François, «Design in Gothic Architecture», *Journal of the Society of Architects Historians*, 37 (1968), pp. 49-71.

ERLANDE-BRANDENBOURG, Alain, PERNOUD, Régine, GIMPEL, Jean y BECHMANN, Roland, *Carnet de Villard de Honnecourt*, París, 1986.

PINTO, Francisco y JIMÉNEZ, Alfonso, «Monteas en la catedral de Sevilla», *Revista de Expresión Gráfica Arquitectónica*, nº 1 (1993), pp. 79-84.

RABASA DÍAZ, Enrique, «Arcos esviados y puentes oblicuos, el pretexto de la estereotomía del siglo XIX», *Obra pública*, *Ingeniería e Historia* I, nº, 1 (1996), pp. 561-475.

RECHT, Roland, *Le dessin d'architecture. Origine et fonctions*, París, 1995.

RUIZ DE LA ROSA, José Antonio, *Traza y simetría de la arquitectura, en la Antigüedad y Medievo*, Sevilla, 1987.

RUIZ DE LA ROSA, José Antonio y RODRÍGUEZ ESTÉVEZ, Juan Clemente, «Monteas en las azoteas de la catedral de Sevilla. Análisis de testimonios gráficos de su construcción», *Actas del III Congreso Nacional de Historia de la Construcción*. Sevilla, 2000.

SHELBY, Lon R, *Gothic Designs Techniques, the Fifteenth-century Design Booklets of Mathes Roriczer and Hans Schmuttermayer*, Carbondale, 1977.